

1. 橋梁用“ダイス・ロッド式摩擦ダンパー”の低温時性能に関する実験的研究

Study on the Performance of a "Die and Rod type Friction Damper" at Low Temperatures

土田 堯章* 波田 雅也* 山崎 彬* 下村 将之*

—概要—

筆者らは、橋梁の支承部に「ダイス・ロッド式摩擦ダンパー®（以下、摩擦ダンパー）」を設置して耐震性向上を図る技術を提案している（図1）。摩擦ダンパーのエネルギー吸収性能や耐久性は、先行研究において実験的に確認されている。しかし、寒冷地を想定した低温時の性能は確認されていない。寒冷地でダンパーを用いる場合は、低温時性能を適切に考慮して設計する必要がある。そこで、本研究では、摩擦ダンパーの低温時性能を確認することを目的とした載荷実験を行った（写真1）。

—技術的な特長—

摩擦ダンパーの摩擦機構（図2）は、ダイス（鋼材の環）とロッド（銅合金の芯棒）で構成される。ダイスの内径より少し太いロッドをダイスに挿入することで、ロッド外周に締め付け力が常に作用し、ダイスがロッド上を摺動するとロッド外周に摩擦力が発生する。研究対象としている低温状態では、線膨張係数が異なるダイスとロッドの内・外径が常温時に比べて収縮するため、締め付け力の低下に応じて摩擦荷重が低下すると考えられる。

実験の結果、常温（約23℃）から-30℃まで温度を下げて安定した完全弾塑性型の履歴形状を示し、摩擦荷重の変化は-10%以下であったことから、摩擦ダンパーは温度依存性の小さい優れた低温時性能を有することが確認された（図3、4）。

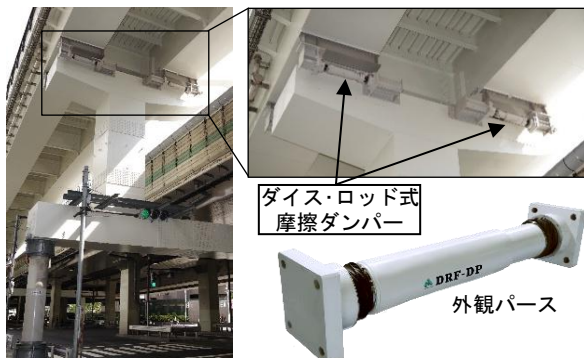


図1 摩擦ダンパーを用いた橋梁耐震補強工法

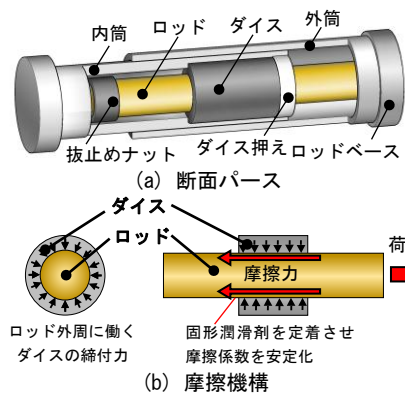


図2 摩擦ダンパーの概要



写真1 実施状況

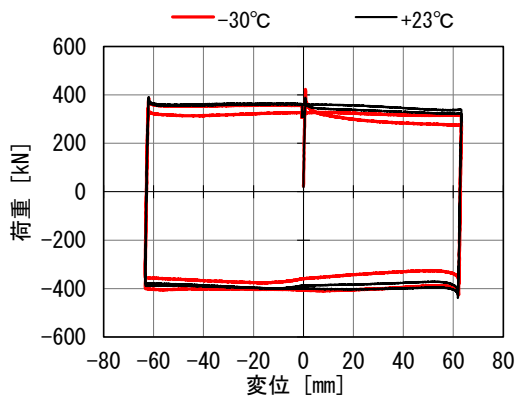


図3 荷重 - 変位関係の比較 (No. 2)

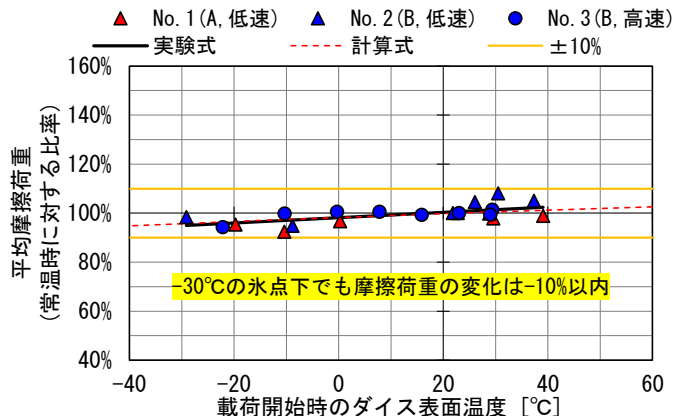


図4 摩擦荷重と温度の相関関係

※本報の一部は、令和7年度土木学会全国大会第80回年次学術講演会(CS10-76, 2025.08)で発表済みである。

*技術研究所 構造研究部

橋梁用“ダイス・ロッド式摩擦ダンパー”の低温時性能に関する実験的研究 Study on the Performance of a "Die and Rod type Friction Damper" at Low Temperatures

○土田 堯章* 波田 雅也* 山崎 彬* 下村 将之*
Takaaki TSUCHIDA Masaya HADA Akira YAMASAKI Masayuki SHITAMURA

ABSTRACT The authors have proposed a technology to improve earthquake resistance by installing die-rod friction dampers in bridge bearings. The energy absorption performance of friction dampers has been confirmed experimentally, but their performance at low temperatures, such as those found in cold regions, has not been confirmed. In this study, a loading experiment was conducted to confirm the friction damper's performance at low temperatures. The results showed that even when the temperature was lowered from room temperature to -30°C, the change in friction load was less than -10%, confirming that the damper has excellent low-temperature performance.

Keywords :摩擦ダンパー、ダイス・ロッド式、制震、低温時性能
Friction Damper, Die and Rod type, Seismic Control, Performance at Low Temperatures

1. はじめに

筆者らは、橋梁の支承部にダイス・ロッド式摩擦ダンパー（以下、摩擦ダンパー）を設置して、耐震性向上を図る技術を提案している^{1),2)}(図1)。摩擦ダンパーのエネルギー吸収性能や耐久性は、先行研究¹⁾⁻³⁾において実験的に確認されているが、寒冷地を想定した低温時の性能は確認されていない。寒冷地でダンパーを用いる場合は、低温時性能を適切に考慮して設計する必要がある⁴⁾⁻⁶⁾。そこで、本研究では摩擦ダンパーの低温時性能を確認することを目的とした載荷実験を実施した。

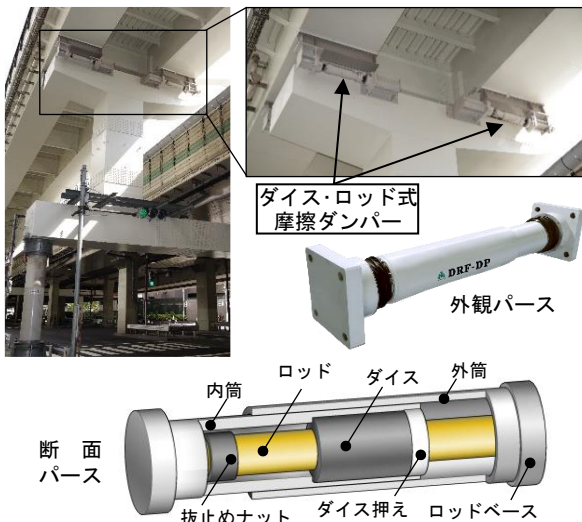


図1 摩擦ダンパーを用いた橋梁耐震補強工法

2. ダイス・ロッド式摩擦ダンパー

摩擦ダンパーの摩擦機構を図2に示す。摩擦ダンパーは、ダイス（鋼材の環）とロッド（銅合金の芯棒）で構成される。ダイス内径より少し太いロッドをダイスに挿入することで、ロッド外周に締付け力が常に作用し、ダイスがロッド上を摺動するとロッド外周に摩擦力が発生する。摩擦荷重 F_{dp} は、締付け力 P_{die} に摩擦面の摩擦係数 μ を乗じることで求められる ($F_{dp} = P_{die} \cdot \mu$)^{1),3)}。

締付け力は弾性理論解^{3),7)}に基づいて算定され、ダイスとロッドの内・外径とダイス長さを変えることで調整する。また、摩擦係数 μ は摩擦面に二硫化モリブデン系の固形潤滑剤を定着させることで安定させている^{1),3)}。

本研究で対象としている低温状態では、ダイスとロッドの内・外径が常温時に比べて収縮する為、締付け力の低下に応じて摩擦荷重は低下することが考えられる。

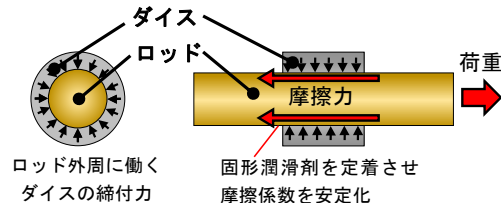


図2 摩擦ダンパーの摩擦機構

*技術研究所 構造研究部

※本報の一部は、令和7年度土木学会全国大会第80回年次学術講演会(CS10-76,2025.08)にて発表済みである。

3. 実験方法

3.1 試験体

試験体の規格を表 1 に示す。試験体には、設定摩擦荷重：400kN、最大ストローク：±80mm の摩擦ダンパーを用いた。ダイス外径が 95mm、ダイス内径とロッド外径が約 59mm であり、試験体数は 2 体 (A, B) とした。なお、実際の設置状況よりも厳しい条件下における低温時性能を確認するため、外筒を外し、ロッドが露出した状態で試験を実施した。

3.2 冷却方法と載荷方法

冷却方法と載荷方法を図 3 および写真 1 に示す。本実験では、試験体を試験装置に設置した状態で周囲を厚さ 100mm の断熱材で覆い、その中に冷却材として板状に加工されたドライアイス投入して冷却した。半日程度かけて冷却した後、上部の断熱材と冷却材をばらして試験機に接続し載荷を行った。計測項目は、荷重と変位およびダイス・ロッド・内筒の表面温度である。なお、試験実施時期は夏季（試験場内室温：約+30°C、湿度：約 60%）であり、冷却したロッド表面に結露や霜が生じる環境であった（写真 1(f)）。

3.3 入力波形

入力波形を表 2 に示す。速度一定の三角波とし、低速（速度 0.4cm/s、振幅±64mm）と高速（速度 6.0cm/s、振幅±32mm）の 2 種類とした。1 回あたりの繰返し数は 2 サイクルとした。

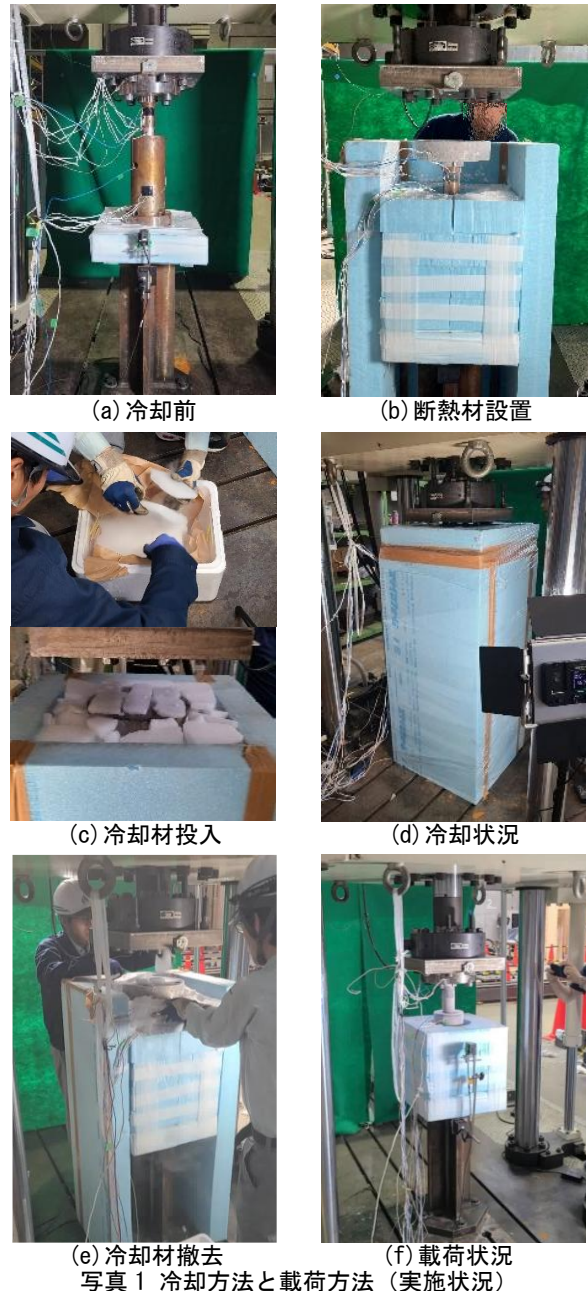


写真 1 冷却方法と載荷方法（実施状況）

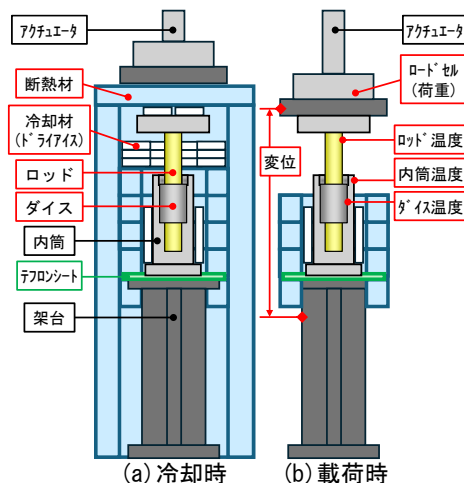


図 3 冷却方法と載荷方法（概念図）

表 1 試験体

試験体	規格
A	・ 設定摩擦荷重：400kN、最大ストローク：±80mm
B	・ ダイス外径：95mm、ダイス内径とロッド外径：約59mm

表 2 入力波形

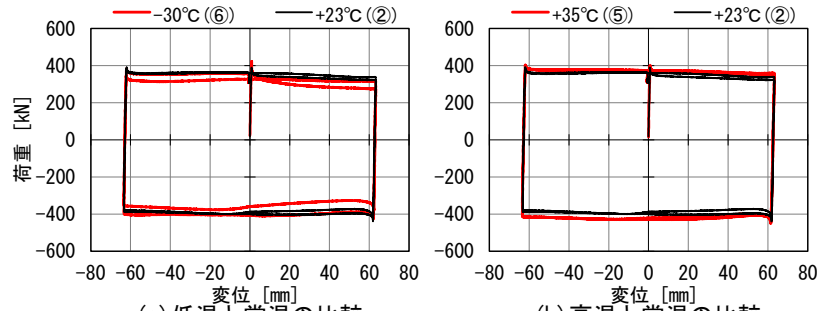
波形	種類	速度 V [cm/s]	振幅 A [mm]	周期 T [s]	繰返し数 n [サイクル]	継続時間 Σ T [s]	累積変位 Σ δ [mm]
低速	三角波	0.4	64	64.0	2	128	512
高速	三角波	6.0	32	2.1	2	4.3	256

表 3 載荷パターン一覧

ケース	試験体	波形	試験開始時のダイス表面温度 [°C]							
			-20°C	-10°C	±0°C	+23°C	+30°C	+40°C		
No. 1	A	低速	(5)	(6)	(4)	(2)	(1)	(3)		
No. 2	B	低速	(6)	(3)	(2)	(4)	(1)	(7)	(5)	
No. 3	B	高速	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(1)	(8)

3.4 荷重条件

荷重パターンの一覧を表 3 に示す。荷重パターンは、試験体と入力波形の組み合わせを変更した No.1~3 の 3 ケースとし、荷重開始時のダイス表面温度をおよそ-30℃~+40℃まで変化させた合計 21 パターンの荷重を実施した。表中の括弧書き①~⑧は、ケースごとの実施順序である。摩擦ダンパーは、荷重時のエネルギーを摩擦熱に変換して吸収し、温度が上昇する。そのため、本実験では、15 分以上のインターバルをあけて、ダイス表面温度の変動が落ち着いたことを確認した上で、次の荷重を実施した。



(a) 低温と常温の比較 (b) 高温と常温の比較
図 4 荷重 - 変位関係(ケース No. 2)

表 4 結果一覧(ケース No. 2)

パターン	試験名	サイクル	E吸収量 [kJ-mm]	平均摩擦荷重 [kN]	切片荷重 [kN]		最大荷重 [kN]		ダイス表面温度 [°C]			
					+	-	+	-	開始	最大	上昇	
No. 2	低温	-30°C (⑥)	1	83252.5	328.4	-	-358.6	371.4	-376.3	-29.1	9.6	38.7
		2	93060.7	369.2	327.0	-406.9	373.9	-409.4				
	常温	+23°C (②)	1	91871.5	363.9	-	-386.7	384.3	-421.2	21.9	60.5	38.6
		2	94806.2	375.5	360.5	-399.7	379.9	-427.3				
	高温	+35°C (⑤)	1	98464.9	390.0	-	-422.6	399.8	-438.1	37.4	76.1	38.7
		2	99560.5	394.4	373.4	-427.9	402.4	-443.4				
低温 (-30°C) / 常温 (+23°C)				90.6%	90.2%	-	92.7%	96.6%	89.3%	-	-	100.1%
高温 (+35°C) / 常温 (+23°C)				98.2%	98.3%	90.7%	101.8%	98.4%	95.8%	-	-	100.3%
				107.2%	107.2%	-	109.3%	104.0%	104.0%	-	-	100.3%
				105.0%	105.0%	103.6%	107.1%	105.9%	103.8%			

※1: 平均摩擦荷重は、1サイクル毎にE吸収量(=E)を総滑り量で除した値。 ※2: 切片荷重は、Y切片を通過する時の値。

4. 実験結果

4.1 荷重 - 変位関係

荷重 - 変位関係と結果一覧をケース No.2 の試験結果から抜粋し、低温 (-30°C(⑥)) と高温 (+35°C(⑤)) をそれぞれ常温 (+23°C(②)) と比較して図 4 および表 4 に示す。図より、摩擦ダンパーは-30°Cの低温でも常温と同様に完全弾塑性型の安定した履歴形状を示していることがわかる。摩擦荷重は、常温に対して低温では小さく、高温では大きくなっている。なお、低温に着目すると、1サイクル目より2サイクル目の荷重が大きく、常温に近づいている。これは、図 5 に示す様に、1サイクル目で吸収した摩擦熱の影響と考えられる。

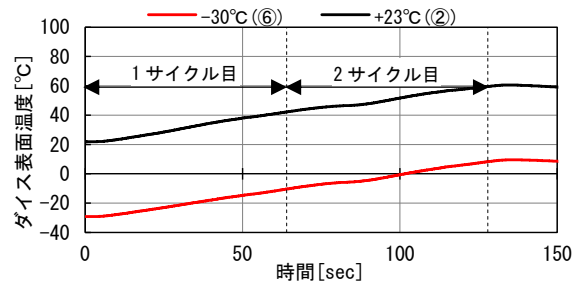


図 5 時刻歴波形(ダイス表面温度)

4.2 摩擦荷重と温度の相関

本実験で実施した全 21 パターンについて、摩擦荷重と温度の相関を図 6 に示す。縦軸は 2 サイクル目の平均摩擦荷重であり、常温時の荷重で除して、

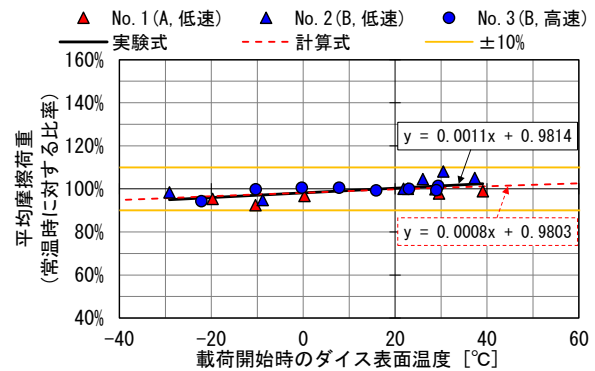


図 6 摩擦荷重と温度の相関関係

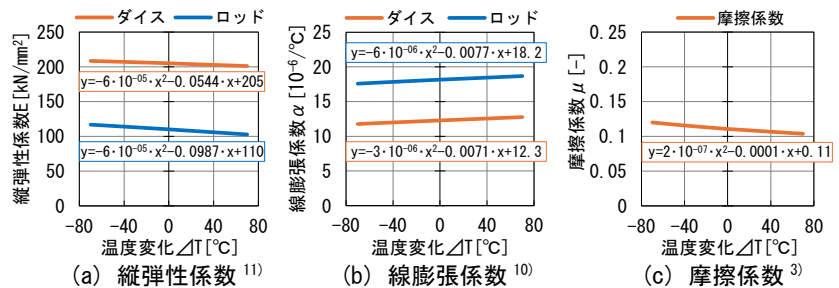


図 7 温度変化に伴う物性変化³⁾¹⁰⁾¹¹⁾

無次元化している。図より、摩擦ダンパーは、温度が低下するにつれて摩擦荷重が低下する温度依存性が認められる。しかし、常温(+23°C)から氷点下-30°Cまで温度を下げても摩擦荷重の変化は-10%以下であり、温度依存性の小さい優れた低温時性能を有することが確認された。

図6中の計算式(赤破線)は、摩擦ダンパーの温度依存性を推定したものである。ダイス(鋼材の環)とロッド(銅合金の芯棒)などの金属系材料の縦弾性係数や線膨張係数は、図7(a)(b)に示す様に、温度に応じて変化することが知られている^{10),11)}。また、二硫化モリブデン(固形潤滑剤)の摩擦係数^{9),12)}は温度変化に殆ど影響されないとされるが、固形潤滑剤を定着させたダイス・ロッド接触面の摩擦係数には面圧依存性³⁾があることがわかっており、温度変化に伴いダイス・ロッドの線膨張により面圧(=締付け力/接触面積)が変化するため、図7(c)に示す様に摩擦係数も間接的に温度変化に依存する。これらの知見を加味し、摩擦ダンパーの温度依存性を弾性理論解^{3),7)}に基づき推定した計算式(図6中の赤破線)は、実験式(最小二乗法による実験結果の近似式)と良く対応しており、摩擦ダンパーの温度依存性のメカニズムが、理論的に説明可能であることがわかった。

5. まとめ

本研究では、橋梁の耐震性向上技術に用いる摩擦ダンパーについて、低温時性能の確認を目的とした載荷実験を実施した。

その結果、摩擦ダンパーは、温度が低下するにつれて摩擦荷重が低下する温度依存性が認められたものの、常温(約+23°C)から氷点下-30°Cまで温度を下げても、摩擦荷重の変化は-10%以下であったことから、温度依存性の小さい優れた低温時性能を有していることが確認された。

また、摩擦ダンパーの温度依存性のメカニズムは、理論的に説明可能であることがわかった。

【参考文献】

- 1)波田雅也ほか：橋梁の耐震補強に用いるダイス・ロッド式摩擦ダンパーの開発，土木学会論文集 A1, Vol.75, No.2, pp.95-110, 2019.5
- 2)波田雅也ほか：摩擦ダンパーを用いた既設橋脚の地震時損傷制御技術の適用，土木学会インフラメンテナンス実践研究論文集，Vol.1, No.1, pp.261-268, 2022.3
- 3)上田英明ほか：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震補強に用いるリング機構式摩擦ダンパーに関する研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.88, No.810, pp.1273-1283, 2023.8
- 4)北海道土木技術会 鋼道路橋研究委員会：北海道における鋼道路橋の設計施工指針，2014.10
- 5)土木研究所：免震・制振デバイスの低温時性能評価に関する研究，土木研究所成果報告書，No.17, pp.1-6, 2014.3
- 6)宮森保紀ほか：橋梁耐震補強用ストッパーの寒冷地における特性の検討，土木学会地震工学論文集，pp.1244-1249, 2007.8
- 7)日本機械学会：機械工学便覧，丸善，1989
- 8)バウデン・テイバー：固体の摩擦と潤滑(曾田範宗訳)，丸善，1975.2
- 9)松永正久：固体潤滑ハンドブック，幸書房，1982
- 10)日本産業規格：JIS B8265:2017 (圧力容器の構造—一般事項)
- 11)日本伸銅協会：伸銅技術データベース，https://www.copper-brass.gr.jp/data/file/banjou/result/bjr00700_1.pdf
- 12)竹内栄一：二硫化モリブデン(MoS₂)の潤滑性について(2)，金属表面技術，Vol.11, No.2, pp.64-70, 1960